ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

№ 3 ЭНЕРГЕТИКА 1978

УДК 532.529

ОБОБЩЕННАЯ ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА КАПЕЛЬ ПО РАЗМЕРАМ

Кандидаты техн. наук, доценты Э. Г. БРАТУТА, А. Р. ПЕРЕСЕЛКОВ

Харьковский ордена Ленина политехнический институт имени В. И. Ленина

Расчет и оптимизация тепло- и массообменных аппаратов, в которых имеет место течение дисперсных газожидкостных потоков, связаны с необходимостью установления функции распределения капель по размерам.

Из чисто эмпирических уравнений наиболее известна функция Розина—Рамлера, в которой [1] даже для одного и того же механизма диспергирования коэффициенты n и b в указанном уравнении функции распределения объема капель по диаметру

$$v(D)=nbD\exp(-bD^n) \tag{1}$$

оказываются постоянными лишь для узкого диапазона физических свойств жидкости и режима работы распылителя.

Аналогичной особенностью обладает также получивший широкое применение логарифмически-нормальный закон, предложенный А. Н. Колмогоровым [2]

$$v(D)=(\sqrt{2\pi}\lg\sigma)^{-1}\exp\left[-\frac{(\lg D-\lg D_{\text{м}})^2}{2\lg^2\sigma}\right], \tag{2}$$

где σ и $D_{\text{м}}$ — дисперсия и математическое ожидание;
D — размер капель.

Отмеченные особенности изменения параметров распределения в уравнениях (1) и (2) создают дополнительные трудности, особенно в тех случаях, когда при численном решении краевых задач тепло- и массообмена рассматривается процесс, при котором физические свойства капель и их размеры претерпевают резкое изменение.

Помимо формирования функции распределения капель по размерам путем прямых эмпирических либо теоретических построений [2, 3], существует и определенный косвенный путь. Указанные функции можно получить в результате установления аналитической связи между некоторой физической величиной (в дальнейшем измеренной в эксперименте) и функцией распределения капель по размерам, однозначно определяющей эту величину. В качестве такой величины, к примеру, может быть использована интенсивность рассеивания света в полидисперсной среде [4] либо частота $h(S)$ замыкания каплями двух электродов, концы которых расположены на расстоянии S друг от друга [5].

В последнем случае величина $h(S)$ определяется как

$$h(S)=\int_0^\infty L(S,\ D)\,\varphi_0(D)\,dD, \tag{3}$$

где $L(S, D)$ — вероятность того, что капля заданного размера в ограниченном объеме коснется двух точек, расположенных на расстоянии S. Вид функции $L(S, D)$ устанавливается из чисто геометрических предпосылок;

$\varphi_0(D)$ — искомая ненормированная функция плотности распределения количества капель по размерам.

При дальнейшей разработке метода измерения размеров капель, предложенного Виксом и Даклером [5], представилось возможным [6] интегральное уравнение Вольтера первого рода (3) свести к уравнению Абеля, решение которого позволило получить нормированную однопараметрическую функцию распределения объема капель по размерам в виде

$$v(D) = \frac{2}{3\pi} \alpha^4 D^3 K_1(\alpha D), \tag{4}$$

где $K_1(\alpha D)$ — функция Бесселя первого порядка.

Решение (4) справедливо при условии, когда экспериментально найденные значения $h(S)$ можно во всем интервале размеров капель, а следовательно, и величин S аппроксимировать уравнением вида

$$h(S) = B \exp(-\alpha S), \tag{5}$$

где B и α — некоторые коэффициенты, при этом коэффициент B не входит в нормированную функцию распределения, так как сокращается при нормировке.

Очевидно, что если при любых механизмах и способах распыла жидкости измеряемая величина $h(S)$ может быть аппроксимирована функцией одного и того же вида, то и $v(D)$ будет иметь общий характер. При этом существенно то обстоятельство, что если выполняется условие (5), то функция $v(D)$ в полной мере характеризуется одним параметром распределения α.

В ранее выполненной работе [7] и специально поставленных опытах установлено, что с достаточной степенью точности уравнение (5) справедливо при самых разнообразных способах диспергирования.

Как видно из рис. 1, при дроблении жидкости с помощью центробежных форсунок (зависимость *1*), пневматических (*2*), дисковых (*3*), распылителей, дроблении пленки конденсата при сходе с выходной кромки лопатки паровой турбины (*4*), а также диспергирование жидкости в по-

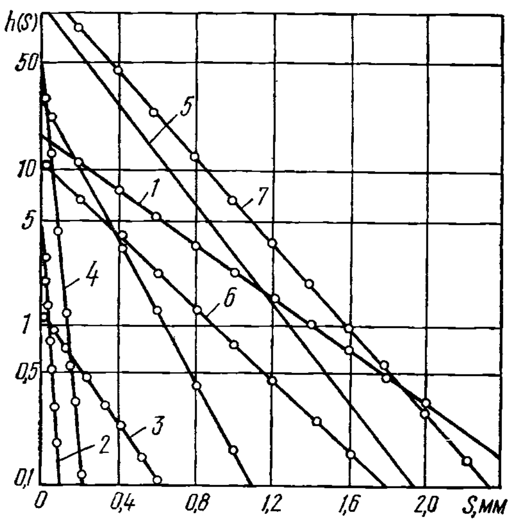

Рис. 1. Зависимости $h=f(S)$

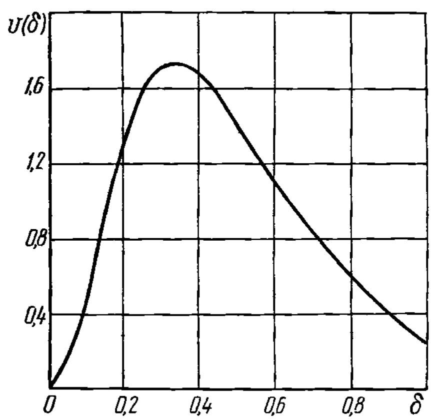

Рис. 2. Обобщенная функция распределения объема капель по размерам

токе газа (*5*) [5] с достаточной точностью представляется возможным величину $h(S)$ аппроксимировать уравнением (5).

Дополнительно к перечисленным методам распыла были исследованы случаи дробления капель при взаимодействии дисперсных потоков, продуцируемых двумя центробежными форсунками (*6*), а также процессы вторичного распада капель при столкновении их с металлической сеткой (*4*). В качестве распылителя, объединяющего несколько способов диспергирования, в указанном смысле была испытана комбинированная струйно-центробежная форсунка (*7*), для которой, как и для уже упомянутых случаев, имеет место указанный характер функции $h(S)$.

Так как на характер функции распределения в общем случае оказывает влияние возможное дробление или ортокинетическая коагуляция, во всех перечисленных случаях проводилось исследование дисперсного состава потока капель по его длине вплоть до сечений, за которыми размер капель оставался неизменным. При этом установлено, что и в тех случаях, когда наблюдается заметное изменение дисперсного состава, величина $h(S)$ хорошо описывается уравнением (5).

Можно полагать, что перечисленные методы распыла жидкости охватывают практически все возможные механизмы образования дисперсной жидкостной среды, исключая, возможно, не исследованный в соответствующем плане метод ультразвукового и пропилентного дробления жидкости, а также эмульгирование.

Возвращаясь к уравнению (4), следует заметить, что при однопараметрическом характере функции распределения должна существовать однозначная связь между максимальным размером капли D_{max} и параметром распределения α.

Очевидно, что при выбранной определенным образом величине D_{max} и неограниченном времени наблюдения вероятность того, что появится капля с диаметром больше D_{max} всегда отлична от нуля. Поэтому, в соответствии с существующими рекомендациями [8], в качестве D_{max} примем величину, при которой

$$\int_0^{D_{max}} v(D)\,dD = 0{,}95. \tag{6}$$

Путем численного интегрирования (6) с учетом (4) была установлена связь между величинами α и D_{max} в виде

$$\alpha D_{max} = 7. \tag{7}$$

Выполняя над уравнением (4) функциональное преобразование $D = \delta D_{max}$, с учетом выражения (7) получим соответствующую обобщенную функцию распределения в виде

$$v(D) = 510\delta^3 K_1(7\delta). \tag{8}$$

Графическая ее интерпретация показана на рис. 2.

В качестве дополнительного критерия приемлемости однопараметрической функции распределения (8) для описания дисперсного состава капель, образованных с помощью различных распылительных устройств, нам представилось целесообразным использовать величину относительной ошибки при определении удельной поверхности капель

$$\varkappa = \frac{e_i - e_0}{e_0}, \tag{9}$$

где e_0 — удельная поверхность капель, м²/кг, вычисленная по гистрограмме первичных экспериментальных данных, полученных путем улавливания капель на иммерсионный слой;

e_i — та же величина, соответствующая той или иной аппроксимирующей функции $v(D)$.

При этом

$$e_i = \frac{6}{\rho_ж} \int_0^{D_{max}} \frac{v(D)}{D} dD, \qquad (10)$$

где $\rho_ж$ — плотность жидкости, кг/мм^3.

В результате обработки серии гистограмм, полученных при различных способах распыливания, установлено, что для уравнения Розина—Раммлера $\varkappa = 4$—7%, для логарифмически нормального закона $\varkappa = 10$—16% и при использовании уравнения (8) $\varkappa = 6$—10%.

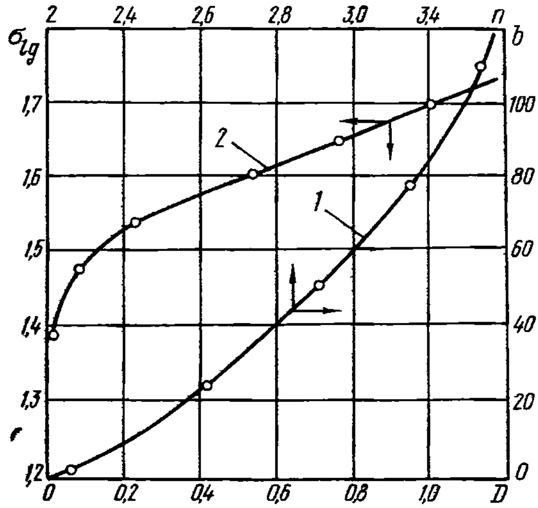

Рис. 3. Связь параметров распределения в уравнениях (1) и (2)

То обстоятельство, что однопараметрическое уравнение (8) с достаточной степенью точности описывает дисперсный состав капель, позволило предположить, что известные двухпараметрические законы (1) и (2) должны быть также, по сути, однопараметрическими, т. е. между параметрами распределения в указанных законах применительно к процессам диспергирования жидкости должна иметь место однозначная связь. На основе параметризации экспериментально полученных гистограмм при различных дисперсных составах капельных сред построены указанные зависимости, подтверждающие сделанное предположение. Кривые *1* и *2* (рис. 3) иллюстрируют связь между параметрами распределения в уравнениях (1) и (2) соответственно.

В настоящее время применительно к некоторым способам дробления жидкости [3, 8, 9] предложены либо аналитические, либо критериальные уравнения для определения величины D_{max}. В этой связи следует отметить, что установленная возможность использования функции (8), единственным параметром которой является D_{max}, создает очевидные предпосылки для теоретического описания дисперсного состава капель и в ряде случаев исключает необходимость в проведении эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Реусова Л. А., Лыков М. В. Влияние некоторых факторов распыления н распределение капель по размеру.— «ИФЖ», 1970, т. XIX, № 5, с. 920—924.

2. Колмогоров А. Н. О логарифмически-нормальном законе распределения ра: меров частиц при дроблении.— «ДАН СССР», 1941, т. XXXI, № 2, с. 99—101.

3. Треш Г. Распыливание жидкости. «Вопросы ракетной техники», 1955, № ‹ с. 108—128.

4. Шифрин К. С. Рассеивание света в мутной среде. М., Гостехиздат, 1951.

5. Викс М., Даклер А. Новый метод измерения распределения размеров капел электропроводной жидкостью в двухфазном потоке.— В кн.: Достижения в области теп лообмена. М., «Мир», 1970, с. 171—187.

6. Братута Э. Г., Переселков А. Р. Расчет функции распределения капелі по размерам при использовании счетно-импульсного метода.— «ИФЖ», 1974, т. XXVII № 5, с. 923—924.

7. Братута Э. Г., Переселков А. Р. К вопросу о новом методе измерени размеров капель.— В кн.: Энергетическое машиностроение. Харьков. Изд-во ХГУ, 1974 вып. 18, с. 130—136.

8. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реак тивных двигателей. «Машиностроение», М., 1964. 525 с. Авт.: Б. В. Раушенбах, С. А. Бе лый и др.

9. Волынский М. С. О дроблении капель в потоке воздуха.— «ДАН СССР», 1948 т. 62, № 3.

Представлена кафедрой
общей теплотехники

[27.V.1977